

# Weltbilder der Physik zu Beginn des 21. Jahrhunderts

Hans J. Pirner

Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg

## 1. Bilder in Bewegung

„Das Weltbild (der Physik) steht überhaupt nicht fest. Wir haben gerade erst begonnen, darüber nachzudenken“, so bemerkt der bedeutende Quantenphysiker A. Zeilinger auf dem Umschlag seines Buchs mit dem Titel „Einsteins Schleier...“<sup>1</sup>. S. Hawking beginnt den Aufsatz „Das Universum in einer Nussschale“ mit einem Zitat aus Shakespeares Hamlet: „O Gott, ich könnte in einer Nussschale eingesperrt sein und mich für einen König von unermesslichen Gebieten halten...“<sup>2</sup>. Das erste Zitat gibt die Dynamik der Physik am Beginn dieses neuen Jahrhunderts wieder. Alles ist in Umordnung. Im zweiten Zitat relativiert der Shakespearesche Satz aus dem Munde eines Physikers die großartigen Leistungen der Physik des letzten Jahrhunderts. Er erlaubt nachzudenken und zu fragen: Was für ein Bild der Welt haben die Physiker? Ist es nur ein Bild? Zu Beginn des 20. Jahrhunderts haben die Erneuerer der Physik ihre Weltsicht und ihre Weltbilder gerne in philosophischen Artikeln erzählt. Das Ende des vergangenen Jahrhunderts war dagegen mehr von einer gegensätzlichen Haltung „Against Philosophy“ geprägt, wie ein Kapitel in S. Weinbergs populärwissenschaftlichem Werk „Dreams of a Final Theory“<sup>3</sup> beschrieben ist. Der folgende Aufsatz will eine Mittelstellung einnehmen und versuchen, die Bilder der Physik zu präsentieren, die den augenblicklichen Zustand der Physik charakterisieren, aber er erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Empirie, Berechenbarkeit und Ästhetik sind eigenständige Phänomene der Physik. Die Auswahl ist geprägt von meinem Detailwissen, das ich als theoretischer Physiker, dem viele neuere Entwicklungen der angewandten Physik entgehen, besitze, genauso wie ich die schnell vor sich gehenden Entwicklungen in der Kosmologie nur verfolgt und nicht aktiv mitgestaltet habe. Die Bilder sollen Ausschnittsvergrößerungen sein, die dem Leser den gegenwärtigen Stand des wissenschaftlichen Prozesses zeigen und gleichzeitig aber auch den freien Raum beschreiben, der offen ist für

<sup>1</sup>A. Zeilinger, *Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik*, München 2003, Umschlaghinteren

<sup>2</sup>S. Hawking, *Das Universum in einer Nussschale*, München (DTV), 2003, S. 77

<sup>3</sup>S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, New York, 1992, Chap. 7

Spekulationen. Der Besuch dieser Bildergalerie der Besichtigung einer Baustelle. Überall arbeiten den Bildern, verfeinern Details, nehmen eine andere Naturwiedergabe besser zu treffen, oder übermalen es an der Zeit ist, in den Hintergrund zu treten. In dem bestimmten Ort. In der Antarktis werden Detektoren in den Fernen des Weltalls lauschen Satelliten auf Universums und im Labor des Instituts um die Ecke zusammengesetzt. In diesem Aufsatz will ich die Elementarteilchenphysik, Quantenmechanik und Kosmologie benutzen, um die Weltbilder der Physik zu zeigen. Beginnen Sie mit dem Saal, in welchem die kleinsten Bausteine des Universums zur Schau gestellt werden.

Physik gleich deshalb mehr Physiker und Techniker an Farbe, um den Ton der in wichtige Figur, für die dieses Museum hat keinen in das ewige Eis versenkt, Signale aus der Frühzeit der Erde in Quantencomputer als drei Beispiele die in diesen Rundgang in dem Saal zur Schau gestellt werden.

## 2. Wie elementar sind die Elementarteilchen?

Die Mikrophysik beschäftigt sich mit den elementaren Bausteinen der Materie, aus denen alles weitere zusammengesetzt ist. Im Laufe der letzten 50 Jahre ist die Mikrophysik mit immer besseren Mikroskopen zu immer kleineren

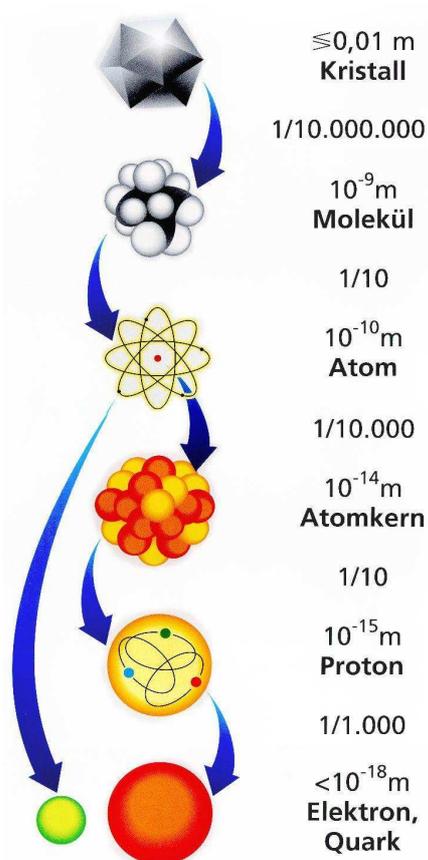


Abbildung 1 : Aufbau der Materie. Die Längenskala ändert sich um einen Faktor  $10^{16} = 10000000000000000$ .

Dimensionen vorgedrungen, in der Hoffnung, dass auf dieser Ebene des Kleinsten das grundlegend Einfachste mit den größten Symmetrien zu sehen ist (Siehe Abb.1). Während das Auge bis auf die Hälfte eines Millimeters Objekte auflösen kann, erweitern normale Lichtmikroskope unsere Anschauung auf den Bereich von Mikrometer großen Bakterien ( $1\text{ Mikrometer} = 10^{-6}\text{ m}$ ). Elektronenmikroskope zeigen mit ihrer kleineren Wellenlänge Goldatome, die auf einer Oberfläche regelmäßig im Abstand von Nanometern ( $= 10^{-9}\text{ m}$ ) angeordnet sind. Das Ergebnis dieser Suche nach den elementaren Bausteinen hat eine Folge von „theoretischen Matroschkas“ produziert. Eine Puppe enthält in sich eine kleinere Puppe, die sich bei näherer Beschäftigung als Mutter einer weiteren kleineren entpuppt. Wenn die Physiker die Elektronen des Atoms abstreifen, finden sie den Atomkern, in dem wiederum Nukleonen aufbewahrt sind, d.h. positiv geladene Protonen und neutrale Neutronen. Durch Erhöhung der Energie der Elektronen um einen Faktor von

100 Millionen ist es möglich, die Bestandteile de analysieren. Obwohl die Kräfte immer stärker werde Ebene etwas Überraschendes: Die Bestandteile der Nu lassen sich nicht mehr isolieren. Wenn die zwei Ant Antiquark, weit voneinander getrennt werden, produz Antiquark-Quark-Paar und vermählen sich zu zwei neu Teilchen, die Mesonen genannt werden. Die Natur hat Zusammensetzung erfunden, die nicht mit der Bindung durch die Schwerkraft oder mit der elektrischen Bin Elektronen an die positiv geladenen Protonen vergle Quarks zusammengesetzte Teilchen hat man Hunderteg sehr kurze Lebensdauer haben. Das Experimentieren Teilchen hat unsein Fenster in die Innenwelt der Bestandteile der Materie geöffnet. Die Physiker benutzen dazu Nachweisgeräte, welche auch die natürliche und kosmische Strahlung bis in kleinste Details messbar machen. Erst in der letzten Zeit sind neutrale extrem leichte und sehr schwach wechselnde Teilchen, die Neutrinos, besser verstanden worden. Sie entstehen z.B. beim Beta-Zerfall von Neutronen in Protonen zusammen mit negativ geladenen Elektronen und waren schon lange bekannt. Erst seit den vergangenen zwei Jahren können wir Eigenschaften ihrer Massen messen.

r Nukleonen selber zu n, geschieht auf dieser kleonen, die Quarks, agonisten, Quark und ieren sie ein weiteres tralen mittelschweren eine neue Art der der Erde an die Sonne dung der negativ geladenen ichtbar ist. Solche aus efunden, die oft nureine mit hochenergetischen

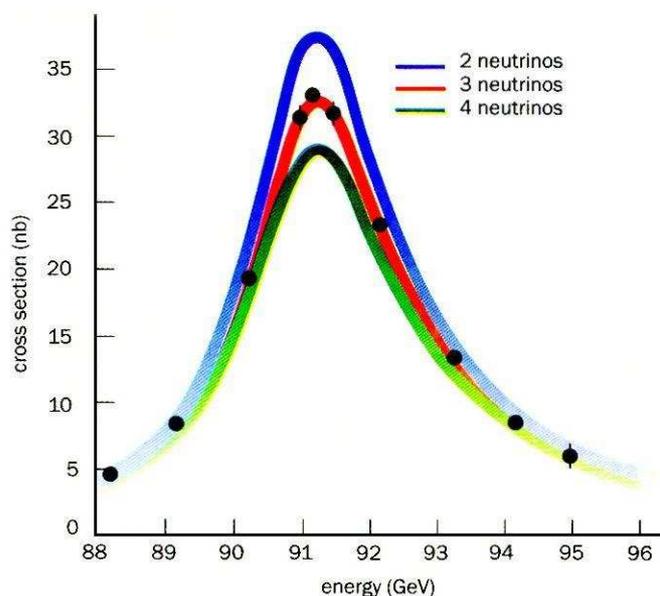


Abbildung 2: Der Wirkungsquerschnitt für Elektron-Positron-Annihilation als Funktion der Energie in der Nähe der Z-Resonanz.

Die Physiker haben ein Modell entwickelt, das alle Daten in der Mikrophysik mit hoher Genauigkeit beschreiben kann. Dieses Standardmodell der Teilchenphysik besteht aus drei Familien von elementaren Teilchen (siehe Tab.1). Jede Familie enthält zwei Arten von je drei verschiedenen, sogenannten „farbigen“ Quarks, und zwei leichte Teilchen, z.B. das Elektron und sein zugehöriges Neutrino, die in einer besonderen Kombination auftreten. Die zweite und dritte Familie sind ähnlich organisiert wie die erste Familie. Sie enthalten aber Teilchen, die erheblich schwerer sind. Mit Hilfe des Standardmodells haben die Physiker nicht nur die Bestandteile dieses Teilchenzoos isoliert, sondern auch die Kräfte analysiert, mit denen die Teilchen unter sich wechselwirken. Man kann sich das so vorstellen, dass sich bei der Wechselwirkung die Materieteilchen Bälle zuspielen und miteinander austauschen. Diese Bälle sind die Photonen,  $W^{\pm}$ -Bosonen und Gluonen. Das Spiel mit den

Photonen bindet gegensätzlich geladene Teilchen elektrisch aneinander. Wenn es zu hart zugeht, sehen wir Licht, z.B. wenn angeregte Atomzustände zerfallen. Die  $W^{\pm}Z^0$ -Bosonen vermitteln den schwachen Beta-Zerfall, der die Lebensdauer von langlebigen Isotopen bestimmt, die z.B. in der Medizin als Diagnosemittel verwendet werden. Die Gluonen mit ihrer extrem starken Farbkraft halten die Quarks im Nukleon zusammen. Zwischen 1982 und 1991 wurden an den beiden Elektron-Positron-Beschleunigern in Genf und Stanford erzeugt worden. Die Intensität ihrer Produktionsrate hängt mit der Anzahl der Familien zusammen, insbesondere mit der Anzahl der Neutrino-Generationen. Gibt es ebenso viele Neutrino-Generationen wie Quark-Generationen? Das Standardmodell sagt drei Arten von Neutrinos voraus. Wie in Abb. 2 zu sehen ist, stimmt die Vorhersage des Standardmodells mit drei Neutrino-Generationen mit dem Experiment überein. Messungen haben die Rechnungen des Standardmodells mit hoher Präzision bestätigt. Die Berechnung des virtuellen Prozesses, die für kurze Zeitalter Fluktuationen zwischen den wohldefinierten Partnern im Anfangs- und Endzustand auftreten können. Es ist die Kontrolle dieser sogenannten Schleifenkorrekturen, die das Standardmodell so erfolgreich machen. Ein ausgeklügeltes System von Symmetrien erlaubt es, die divergierenden Integralen endliche Werte zuzuordnen.

Das Bild der Materie, das aus dem Standardmodell resultiert, ist äußerst vielfältig. Die Suche nach dem Urstoff hat die Physiker dazu gebracht, neben den auf der Erde vorhandenen Teilchen weitere andere Teilchen in das Modell einzubeziehen, die nur künstlich produziert werden und die Erklärung des Urstoffs zur Zeit eher komplizieren. Schon W. Pauli hat bei der Entdeckung des schweren Partners des Elektrons aus der zweiten Familie gefragt, warum der „Schöpfer“ dieses Teilchens geschaffen hat. Dieselbe Frage stellt sich nach der Entdeckung von drei sehr ähnlichen Familien mit noch größerer Dringlichkeit. Ein ungelöstes Problem des Standardmodells ist die Erzeugung der Masse. Neben Ausdehnung ist Masse eine charakteristische Eigenschaft von Materie.

<i>Teilchen</i>			
Fermionen	Familie		
	1	2	3
Neutrino	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
Elektron, Muon, Tau	$e$	$\mu$	$\tau$
Quarks	u	c	t
	d	s	b

Tabelle 1: Materieteilchen (Fermionen) des Standardmodells sind drei Familien.

Sie bestimmt mit welcher Stärke das Objekt durch das Schwerfeld eines anderen Teilchens angezogen wird. In der symmetrischen Formulierung des Standardmodells würden alle Teilchen masselos sein. Nur durch die Wechselwirkung mit einem hypothetischen Teilchen (Higgs-Meson) erhalten sie ihre Masse. Genau dieses Higgsteilchen ist der letzte noch unentdeckte Stein im Brett des Standardmodells und soll an dem nächsten großen Hadronbeschleuniger in Genf mit den höchstmöglichen

Energien produziert werden.

<i>Kräfte</i>		
Wechselwirkung	Koppelt an	Austausch-Teilchen
Stark	Quark	8 Gluonen ( $g$ )
Elektromagnetisch	Elektrische Ladung	Photon ( $\gamma$ )
Schwach	Schwache Ladung	$W^\pm, Z^0$

**Tabelle 2 : Austauschteilchen (Bosonen) des Standardmodells für die starke, elektromagnetische und schwache Wechselwirkung.**

Eine charakteristische Eigenschaft des Standardmodells ist die Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie, welche nur durch die schwache Wechselwirkung verletzt wird. Gleichzeitiger Teilchen-Antiteilchen-Austausch und Ortsspiegelung (rechts - links) ist eine noch schwächer gebrochene Symmetrie, deren Verständnis notwendig ist, um den geringen Anteil von Materie im Vergleich zur Antimaterie im Universum zu erklären. Der Urstoff hat zwei grundsätzlich verschiedene Formen, die man als Materie (Tab. 1) mit Erhaltungsgesetzen für verallgemeinerte Ladungen und als Strahlung (Tab. 2) bezeichnet, welche in der paarweisen Vernichtung von Materie und Antimaterie entsteht. Die Kraftteilchen Photonen,  $W^\pm Z^0$ -Bosonen und Gluonen sind Strahlungsteilchen, während die Quarks, Elektronen und Neutrinos Materieteilchen sind. Symmetrien im Standardmodell spielen eine wichtige Rolle, insbesondere in der besonderen Art ihrer Verwirklichung. Physiker definieren eine Wechselwirkung, z.B. die Kraft zwischen zwei Magneten, als drehsymmetrisch, wenn sie unabhängig ist von der Wahl des räumlichen Koordinatensystems. Viele solcher Elementarmagnete bilden ein magnetisierbares Stück Eisen. Bei tiefen Temperaturen tritt das Phänomen der spontanen Magnetisierung auf: Alle Magnete ordnen sich in einer Richtung an, da die gemeinsame Ausrichtung die Gesamtenergie absenkt und die thermische Unordnung bei niedrigen Temperaturen immer unwichtiger wird. Diese spontane Magnetisierung entspricht einer spontanen Symmetriebrechung. Die Drehsymmetrie des Systems wird gebrochen, der Grundzustand hat einen Zustand gewählt, der nicht mehr symmetrisch unter Drehungen ist. Im Standardmodell wird angenommen, dass die spontane Symmetriebrechung des Vakuums die schweren  $W^\pm Z^0$ -Strahlungsteilchen von den masselosen Photonen unterscheidet lässt.

Das Standardmodell enthält mindestens zwanzig freie Parameter. Wo ist die gesuchte Einfachheit? In der Tat vermutet die Mehrheit der Physiker, dass

unter der Vielfalt der Teilchen vielleicht eine noch Supersymmetrie vorhanden ist, welche Materieteilchen ineinander überführt. Diese Hypothese braucht den N-Symmetriepartnern, die erst bei einer höheren Energie werden können. Die Supersymmetrie mag mit einer neu mehr als drei Dimensionen verbunden sein. Wie im dritten werden wird, ist das Weltbild der elementaren Konstitution Entstehung des Kosmos in seiner Anfangsphase verbunden. Die Kosmologie kann nur drei Prozent der notwendigen Materie/Energie mit den bekannten Elementarteilchen in Verbindung bringen.

h mehr gebrochene n und Kraftteilchen achweis von neuen ieschwelle produziert en Raumstruktur mit itten Abschnitt gezeigt ituenten eng mit der den. Die jetzige terie/Energie mit den

Das Bild des Mikrokosmos ist das angeordnete System der elementaren Teilchen. Die Konstituenten sind nur zusammen mit Gravitation ihr Verhalten bestimmen. Die Form der Wechselwirkung wichtig wie die Materiebestandteile. Alle fundamentalen Wechselwirkungen und die Gravitation sind nach demselben mathematischen Prinzip aufgebaut. Es geht auf Weyl zurück und wird als Eichprinzip bezeichnet. Es besagt, dass nur in einer flachen Geometrie die Geschwindigkeit eine Ortskurve als einfaches Verhältnis der Ortsdifferenz zu der zugehörigen Zeitdifferenz bestimmt werden kann. In gekrümmten Räumen muss der Ortsvektor erst parallel verschoben werden, um ihn mit dem Ortsvektor zur früheren Zeit zu vergleichen. Ähnliche geometrische Operationen müssen in den Räumen durchgeführt werden, die den Symmetrien des Standardmodells entsprechen, um diese Symmetrien in Rechenvorschriften umzuwandeln. Der Physiker kann das Verhalten der Materie nur indirekt mit Hilfe der Gesetze entschlüsseln. Aristoteles hat in diesem Zusammenhang den passenden Begriff der Substanz geprägt, in dem Form und Materie sich vereinigen. Dieser Begriff Substanz ist in der Philosophie umstritten und kommt in der Physik nicht vor. Es gibt aber eine Lagrange-Funktion, in der symbolisch, d.h. mit Hilfe von mathematischen Zeichen, die einzelnen Materie- und Kraftfelder und ihr Zusammenhang kodiert sind. Der Erkenntnistheoretiker A. March<sup>4</sup> hat einen anderen Begriff von Substanz, wenn er sagt: „Die Physik geht also darauf aus, die tote Materie aus ihrem Weltbild zu tilgen und durch ein lebendiges Spiel von Formen zu ersetzen. Einen ersten Schritt hat die Relativitätstheorie unternommen, als sie die Masse für äquivalent mit der Energie erklärte. ... Ungleich schwieriger war es, die Erzeugung und Vernichtung eines Elektronenpaares mit der Annahme einer substantiellen Natur des Elektrons zu vereinbaren.“ In der Erkenntnistheorie ist die alte Diskussion zwischen Materialismus und Idealismus einer Auseinandersetzung<sup>5</sup> zwischen Realismus und Antirealismus gewichen. Die Frage ist, ob diese Elementarteilchen wirkliche Objekte sind oder nur Konstrukte, die es ohne unsere Gleichungen gar nicht gibt. Die Mehrzahl der arbeitenden Physiker ignoriert jedoch diese Diskussion. Sie sind naive Realisten,

den elementaren Systemen der elementaren Teilchen. Die Konstituenten sind nur zusammen mit Gravitation ihr Verhalten bestimmen. Die Form der Wechselwirkung wichtig wie die Materiebestandteile. Alle fundamentalen Wechselwirkungen und die Gravitation sind nach demselben mathematischen Prinzip aufgebaut. Es geht auf Weyl zurück und wird als Eichprinzip bezeichnet. Es besagt, dass nur in einer flachen Geometrie die Geschwindigkeit eine Ortskurve als einfaches Verhältnis der Ortsdifferenz zu der zugehörigen Zeitdifferenz bestimmt werden kann. In gekrümmten Räumen muss der Ortsvektor erst parallel verschoben werden, um ihn mit dem Ortsvektor zur früheren Zeit zu vergleichen. Ähnliche geometrische Operationen müssen in den Räumen durchgeführt werden, die den Symmetrien des Standardmodells entsprechen, um diese Symmetrien in Rechenvorschriften umzuwandeln. Der Physiker kann das Verhalten der Materie nur indirekt mit Hilfe der Gesetze entschlüsseln. Aristoteles hat in diesem Zusammenhang den passenden Begriff der Substanz geprägt, in dem Form und Materie sich vereinigen. Dieser Begriff Substanz ist in der Philosophie umstritten und kommt in der Physik nicht vor. Es gibt aber eine Lagrange-Funktion, in der symbolisch, d.h. mit Hilfe von mathematischen Zeichen, die einzelnen Materie- und Kraftfelder und ihr Zusammenhang kodiert sind. Der Erkenntnistheoretiker A. March<sup>4</sup> hat einen anderen Begriff von Substanz, wenn er sagt: „Die Physik geht also darauf aus, die tote Materie aus ihrem Weltbild zu tilgen und durch ein lebendiges Spiel von Formen zu ersetzen. Einen ersten Schritt hat die Relativitätstheorie unternommen, als sie die Masse für äquivalent mit der Energie erklärte. ... Ungleich schwieriger war es, die Erzeugung und Vernichtung eines Elektronenpaares mit der Annahme einer substantiellen Natur des Elektrons zu vereinbaren.“ In der Erkenntnistheorie ist die alte Diskussion zwischen Materialismus und Idealismus einer Auseinandersetzung<sup>5</sup> zwischen Realismus und Antirealismus gewichen. Die Frage ist, ob diese Elementarteilchen wirkliche Objekte sind oder nur Konstrukte, die es ohne unsere Gleichungen gar nicht gibt. Die Mehrzahl der arbeitenden Physiker ignoriert jedoch diese Diskussion. Sie sind naive Realisten,

<sup>4</sup>A. March, Das neue Denken der modernen Physik, Hamburg, 1957, S. 121

<sup>5</sup>H.J. Pirner, Semiotics of "Postmodern" Physics, Symbol and Physical Knowledge, ed. M. Ferrari and I.O. Stamatescu, S. 211

das wir wissen, dass die Elektronen nur wirklich sein können, da ohne Elektronen keine bunten Bilder über den Fernsehschirm flimmern würden.

Eine Besonderheit charakterisiert das Gebiet der elementaren Wechselwirkungen. Obwohl unsere Welt eine Minkowski-Metrik hat, in der die Zeit eine andere Rolle als der Raum spielt, ist es in der mathematischen Formulierung möglich, in eine sogenannte Euklidische Welt zu transformieren, in welcher Raum und Zeit gleichbehandelt werden. Die virtuellen Prozesse der Vernichtung und Entstehung von elementaren Teilchen sind in dieser Euklidischen Welt vieleinfacher zu beschreiben als in der komplizierteren Minkowski-Welt. In der Thermodynamik, der Wärmelehre, ist die vierte Koordinate auch mit einer imaginären Zeit zu beschreiben - wirklich die Zeit gibt es im Wärmegleichgewicht nicht. Vorgänge in dieser vierten Koordinate sind periodisch und führen zu einer gewissen Ähnlichkeit zwischen euklidischen und thermischen Feldtheorien. In einer gewissen Behandlung der Quantentheorie schwarzer Löcher kommt auf diese Weise auch der Begriff der Temperatur eines schwarzen Lochs ins Spiel. Schwarze Löcher sind unter dem Einfluss der Schwerkraft kollabierte Sterne, deren Schwerkraftpotential so stark ist, dass Licht nicht mehr das schwarze Loch verlassen kann. Deshalb erscheint dieses Objekt am Sternenhimmel als schwarz. Die Analogie zwischen Euklidischen Feldtheorien und elementarer Wechselwirkung erlaubt die Computersimulation von Quantentheorien. Dies hat zu einem gemeinsamen Verständnis der Physik der kondensierten Materie bei tiefen Temperaturen wie dem oben besprochenen Magneten und dem Vakuum des Standardmodells geführt. Der Prozess der spontanen Symmetriebrechung kann so berechnet werden. Der Computer simuliert den Effekt des Ausfrierens des Vakuums bei Erniedrigung der Temperatur in einen gebrochenen Zustand, der zur Bildung der schweren  $W^{\pm}$ -Bosonen führt, deren große Masse die extrem schwachen Zerfälle in Atomkernen produziert. Insofern ist das Standardmodell auch ein computerisierbares Modell des Mikrokosmos.

Wenn man Physiker fragt, wie elementar sind die Elementarteilchen, wird man verschiedene Antworten erhalten. Im allgemeinen akzeptieren die Physiker die mikrophysikalischen Bausteine der physikalischen Welt als funktionale Objekte, die bis zu einer Energieskala bekannt sind, deren Werte sie gerne immer weiter nach oben schieben, was allerdings mit der existierenden Beschleunigertechnologie immer schwerer wird. Unser Wissen über den Urstoff ist zeitabhängig. Das heißt nicht, die gefundenen Teilchen müssten widerrufen werden, es bedeutet aber, dass sie nur intermediäre Erscheinungsformen anderer Gebilde sind, deren mathematisch physikalische Grundlagen erst noch erforscht werden müssen. Stringtheorien z.B. ersetzen eine Theorie von punktförmigen Objekten (Teilchen), die sich auf Raumzeitlinien bewegen, durch eine Theorie von fadenförmig ausgedehnten Objekten. Sie werden diskutiert als mögliche Theorien, die unsere jetzige Vielfalt von elementaren Teilchen erklären können.

## 2. Quantenwirklichkeit in der mesoskopischen Welt?

Das Weltbild der Physik des 20. Jahrhunderts war geprägt von der Quantenmechanik. Ursprünglich wurde diese Theorie erfunden, um das Spektrum eines heißen Strahlers zu beschreiben, insbesondere um die Frage zu beantworten: Welche Intensitäten haben verschiedene Wellenlängen von Licht im Spektrum der heißen Quelle? In der Sonne z.B. ist das sichtbare Licht am stärksten; wahrscheinlich hat die Evolution unser physiologisches Auge gerade so optimiert. Die Mechanik der Quanten macht die Physik der Atome berechenbar, die noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts so geheimnisvoll waren. Seit ihrer Entdeckung haben die Theoretiker ein physikalisches Begriffssystem entwickelt, welches in allen Gebieten der Physik erfolgreich ist. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts erleben wir eine Wiederbelebung der ursprünglichen Diskussion, die am Anfang der Quantenmechanik stand: Die Diskussion zwischen den Verfechtern der neuen Quantenmechanik, Niels Bohr und Erwin Schrödinger auf der einen Seite, und ihren skeptischen Kritikern, Albert Einstein oder David Bohm, auf der anderen Seite. Das gänzliche Neue an dieser Renaissance der Quantenmechanik ist freilich, dass die experimentelle Atomphysik jetzt technische Möglichkeiten erworben hat, eine wichtige Rolle bei der Beantwortung vieler Fragen zu spielen, die früher als philosophische eingestuft wurden. In diesem Abschnitt möchte ich den Schritt von der Mikrophysik zur mesoskopischen Physik machen, der Physik auf mittleren Längenskalen, zwischen dem extrem Kleinen und dem Großen. Viele dieser Experimente benutzen mikroskopische Objekte, einzelne Atome, Photonen oder Moleküle um Zustände zu konstruieren, die auf makroskopischen Dimensionen von Kilometern quantenmechanisches Verhalten zeigen. Die Tendenz geht dahin, immer größere Objekte zu wählen; zur Zeit sind Fullerenes, fußballähnliche Moleküle mit 60 Kohlenstoffatomen die größten Gegenstände solcher Experimente.

Das Bild hinter diesen neuen quantenmechanischen Forschungen ist eng mit der Frage nach der Welt und ihrer Darstellung in unseren Theorien, mit der Dualität von Materie und Geist oder - moderner ausgedrückt - mit dem Unterschied zwischen Wirklichkeit und der Information über diese Wirklichkeit verbunden. Die Experimente von A. Aspect, N. Gisin, A. Zeilinger, S. Haroche und J.M. Raimond, die ungefähr vor zwanzig Jahren begannen, gehen auf Einstein-Podolski-Rosen und Schrödingers Katzen-Paradox im Jahr 1935 zurück. Sie betreffen ein System mit mindestens zwei Untersystemen, die durch die experimentelle Anordnung so miteinander verschrankt sind, dass wir den individuellen Subsystemen, z.B. den Teilchen, keine Eigenschaften zuordnen können, die sie für sich allein besitzen. Um diese Idee der „Verschränkung“ etwas genauer zu definieren, verwende ich den quantenmechanischen Drehimpuls eines Teilchens, der auch Spin genannt wird. Der Drehimpuls beschreibt anschaulich den Schwung, mit dem sich ein Körper um seine Achse

dreht. Die Erhaltung des Drehimpulses macht die Pirouette einer Eisläuferin schneller, wenn sie die ausgestreckten Arme anzieht. Das Elektron hat den Drehimpuls  $1/2$ , deshalb ergibt eine Messung des Drehimpulses entlang einer Achse entweder  $+1/2$  oder  $-1/2$ . Der allgemeinste (un- normierte) Quantenzustand eines Elektrons ist gegeben durch eine Amplitude  $S(n)$ , wobei der Vektor  $n$  die Richtung angibt, in welcher sich die Messung  $+1/2$  ergibt. Ein quanten-mechanisch „verschränkter“ Zustand ist z.B. ein Zustand mit dem totalen Drehimpuls gleich Null, welcher aus einem Elektron mit Spin in Richtung  $n$  und einem Elektron mit Spin in entgegengesetzter Richtung  $-n$  gebildet wird.

ouette einer Eisläuferin . Das Elektron hat den Drehimpuls entlang einer Achse entweder  $+1/2$  oder  $-1/2$ . Der allgemeinste (un- normierte) Quantenzustand eines Elektrons ist gegeben durch eine Amplitude  $S(n)$ , wobei der Vektor  $n$  die Richtung angibt, in welcher sich die Messung  $+1/2$  ergibt. Ein quanten-mechanisch „verschränkter“ Zustand ist z.B. ein Zustand mit dem totalen Drehimpuls gleich Null, welcher aus einem Elektron mit Spin in Richtung  $n$  und einem Elektron mit Spin in entgegengesetzter Richtung  $-n$  gebildet wird.

$$|A\rangle = [S1(+n)S2(-n) - S1(-n)S2(+n)]$$

Falls der Spin des Teilchens 1 mit  $+1/2$  gemessen wird, ist das Teilchen 2 notwendigerweise in einem Spinzustand mit  $-1/2$  oder umgekehrt. Wie man dem symbolischen Ausdruck oben ansieht, kann man dem Teilchen 1 nicht die Eigenschaft zuschreiben, den Spin  $+1/2$  zu haben. Die individuellen Teilchen des Zustandes  $|A\rangle$  haben keine Eigenschaften für sich. J. Bell ist es gelungen nachzuweisen, dass eine lokale klassische Theorie mit trennbaren Eigenschaften für die einzelnen Teilchen und die Quantentheorie zu verschiedenen experimentellen Ergebnissen führen. In der lokalen klassischen Theorie hat jedes Teilchen seine eigenen Variablen und die Messung des Spins 1 entlang jeder Achse wird nur von den Eigenschaften des Teilchens 1 bestimmt. In der Quantentheorie ist das Messergebnis am Teilchen 1 mit dem Ergebnis am Teilchen 2 verbunden. Die in den letzten Jahren durchgeführten Messungen haben der Quantentheorie Recht gegeben.

ird, ist das Teilchen 2 umgekehrt. Wie man dem symbolischen Ausdruck oben ansieht, kann man dem Teilchen 1 nicht die Eigenschaft zuschreiben, den Spin  $+1/2$  zu haben. Die individuellen Teilchen des Zustandes  $|A\rangle$  haben keine Eigenschaften für sich. J. Bell ist es gelungen nachzuweisen, dass eine lokale klassische Theorie mit trennbaren Eigenschaften für die einzelnen Teilchen und die Quantentheorie zu verschiedenen experimentellen Ergebnissen führen. In der lokalen klassischen Theorie hat jedes Teilchen seine eigenen Variablen und die Messung des Spins 1 entlang jeder Achse wird nur von den Eigenschaften des Teilchens 1 bestimmt. In der Quantentheorie ist das Messergebnis am Teilchen 1 mit dem Ergebnis am Teilchen 2 verbunden. Die in den letzten Jahren durchgeführten Messungen haben der Quantentheorie Recht gegeben.

Die Eigenschaft „verschränkter“ Zustände führen zu Schrödingers Paradox. Man wähle für Teilchen 1 eine Katze, deren Eigenschaft, tot oder lebendig zu sein, den Spinzuständen  $+1/2$  und  $-1/2$  entsprechen soll. Der für uns unwahrscheinliche Zustand einer halb lebendigen und halb toten Katze sei realisiert, indem man die Katze zusammen mit einem radioaktiven Kern in eine Kiste bringt, in welcher der Kern durch seinen Zerfall von  $M^* \rightarrow M$  eine Giftlösung verstreut. Dann haben wir folgenden (un- normierten) Zustand:

$$|A\rangle = [|M^*\rangle |Katze\ lebendig\rangle + |M\rangle |Katze\ tot\rangle]$$

Wenn wir die Kiste aufmachen, ist die Katze entweder tot oder lebendig, d.h. in einem der beiden Zustände. Bei dieser Ausdehnung von mikrophysikalischen Symbolen in das Gebiet der makroskopischen Welt kommen wir zu einer anderen Interpretation unserer Wirklichkeit. Der Satz, „Die Welt ist alles, was der Fall ist“, mit dem Wittgenstein in seinem Tractatus Logico-Philosophicus die Welt einschränkt, muss ersetzt werden durch eine Erweiterung unseres

Wirklichkeitsbegriffs, welche Zeilinger <sup>6</sup> so formuliert: „Die Welt ist alles, was der Fall ist und auch alles, was der Fall sein kann.“ Die Katze kann sowohl tot als auch lebendig sein, bevor wir sie im Experiment analysieren. Der Messprozess wird so zu einem wichtigen Kriterium für Wirklichkeit, und damit wird der Beobachter Schöpfer von physikalischer Wirklichkeit. Eine solche Interpretation entspricht der Ansicht des Relativismus, der physikalische Realität außerhalb menschlicher Intervention leugnet. Dieser Meinung kann ich mich nicht anschließen. Jede externe Ankopplung des Systems an seine Umgebung, die auch unbelebt und ohne Bewusstsein sein kann, führt zu einer Dekohärenz der Phasenbeziehung des Zustandes  $|A\rangle$ , die Beziehung zwischen den beiden Summanden des Zustandes geht verloren, es ist ein statistisches Gemisch mit Wahrscheinlichkeiten für die beiden Zustände stellt sich ein. Diese Auflösung der Verschränktheit der Zustände in  $|A\rangle + |B\rangle$  braucht eine gewisse Zeit, die von der Größe des umgebenden Systems und der Stärke seiner Ankopplung abhängt. Haroche und Raimond haben in Experimenten bis zu zehn Photonen angekoppelt und diese Dekohärenz präzise mit Photonen als Beobachtern nachgewiesen.

Was soll man mit den möglichen Zuständen, die nicht gemessen werden anfangen? Verschiedene Schulen haben diesen nichtrealisierten Möglichkeiten in unterschiedlicher Weise interpretiert; die extremste Schule vertritt die Hypothese, dass viele Welten existieren. Durch jeden Messvorgang wird eine spezifische Welt selektiert, die anderen entwickeln sich in der Zeit weiter, verschwinden aber für uns und sind unzugänglich. Eine andere Schule erwägt, dass die Quantenmechanik eine unvollständige Theorie ist, deren tieferen Hintergrund wir erst noch erkunden müssen.

Im Jahr 1995 hat Shor eine Rechenvorschrift entworfen, die mit einem hypothetischen Quantencomputer in viel kürzerer Zeit als mit einem normalen digitalen Computer ausgeführt werden kann. Man kann sich vorstellen, dass durch die Realisierung verschränkter Zustände neuartige Rechenoperationen möglich sind, die der Projektion eines verschränkten Zustandes auf einen anderen entsprechen und dadurch viele Phasenrelationen in einem Schritt testen. Die Projektion eines Zustandes auf einen anderen ist geometrisch der Projektion des Stabes einer Sonnenuhr auf die Zifferntafel ähnlich, die einen Schatten erzeugt. Dieser Schatten enthält die Information über die Position der Sonne, also mehr Information als die Länge des Stabes und seine Orientierung allein. Seit der Entdeckung Shors hat sich das Gebiet der Quantencomputer und der Quanteninformation entwickelt, welches sowohl die grundsätzlichen Rätsel der Quantenmechanik als auch deren Anwendung zum Ziel hat. Neben weiteren Fortschritten in der Quantenkryptografie ist eine Sprache entstanden, die auf Wheeler und Weizsäcker zurückgeht und die Welt als einen Quantencomputer beschreibt. „The it from bit“, das Sein aus der Information, heißt einer der Sätze von Wheeler. <sup>7</sup> Elementare Einheiten der Wirklichkeit sind Bits,

<sup>6</sup>A. Zeilinger, Einsteins Schleier, die neue Welt der Quantenphysik, München 2003, S. 231

<sup>7</sup>J. A. Wheeler with K. Ford, Geons, Black Holes and Quantum Foam, New York 1998, p. 323

Ja–Nein, Entscheidungen, die auf einem subsubmikroskopischen Niveau nicht mehr teilbar sind. Zeilinger<sup>8</sup> behauptet: „Wirklichkeit und Information sind dasselbe“. Dies ist eine Hypothese, die zwar diese Entwicklung in kurzer Weise resümiert aber kaum einer philosophischen Analyse standhält. Vielleicht ist sie als Arbeitshypothese für weitere experimentelle Ausflüge in das Reich der Quantenphänomene insbesondere in makroskopischen Bereichen nützlich. Die Information als Urstoff des Universums scheint allerdings (noch) nicht zum allgemeinen Weltbild der Physiker an der Schwelle zum 21. Jahrhundert zu gehören.

### 3. Kosmologie oder warum verstehen wir so wenig von der Entstehung des Universums?

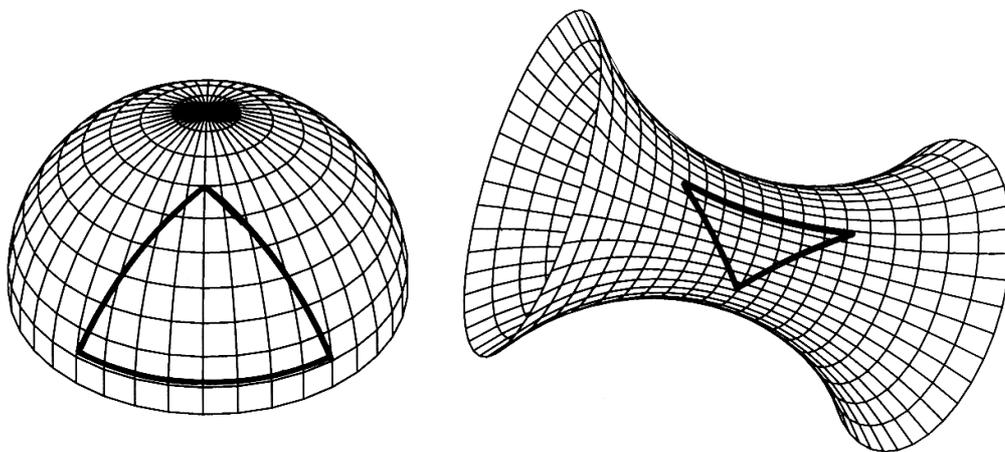
Das Weltbild der Physiker ist schon immer ein Bild der ganzen Welt gewesen, der sichtbaren Alltagswelt und der sichtbar gemachten mikroskopischen Welt. Als physikalische Methode hat es sich bewährt, verwirrende Vorgänge in einzelne Phänomene zu zerlegen und sie mit experimentellen Methoden kontrolliert zu untersuchen. Die gleiche experimentelle Methode ist auf astronomische Objekte nicht anwendbar. Weit von uns liegt unerreichbar in kosmischen Distanzen von  $10^{30}$  m das Universum. Hypothesen und Theorien müssen durch langdauernde Beobachtungen erhärtet werden. Die Astrophysiker des 20. Jahrhunderts haben aktiv Kontakt zum Weltraum aufgenommen, indem sie Satelliten ins All schicken, welche mit spezifischen Messgeräten versehen sind, die optische Messungen der Teleskope in vielfacher Weise ergänzen. Beobachtungen des Kosmos heute zeigen die Vergangenheit des Universums, die uns erst jetzt wegengerendlichen Geschwindigkeit des Lichts erreicht. Sie erlauben uns, eine Zeitreise zum Ursprung des Kosmos zu machen. Die Hypothese eines Anfangs, des Big Bang, in dem Zeit und Raum entstanden sind, gehört zum Bild der Physik. Die Religionen haben aufgehört, unsere Phantasie zu beschäftigen, während die Maschine Wissenschaft sich unablässig vorwärts arbeitet und alte Mythen durch neue Konstrukte ersetzt. Newton und Galilei haben mit den ersten Teleskopen die Positionen der Gestirne und die ihnen zu Grunde liegenden Gesetze erklärt. Sie sind gleichzeitig die Erfinder der modernen Physik und der Astronomie. Sie haben gezeigt, dass die Erde eine Planetenunteracht Planeten ist, welche um unsere Sonne kreisen. Das heliozentrische Weltbild hat die Bedeutung des Menschen relativiert. Die Sonne ist ein Teil der Milchstraße an ihrem äußeren Arm. Unsere Galaxie selbst ist wieder eine von Milliarden Galaxien, welche in Haufen „homogen“ über das ganze Universum verstreut sind. Die neuen Teleskope in den Satelliten entdecken alle Strahlung aus dem All, nicht nur den sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung. Mit diesen Augen hat die Astronomie einen Reichtum neuer Phänomene, wie

<sup>8</sup>A. Zeilinger, ibidem, p. 229

Radiogalaxien, Quasare, Neutronensterne und Doppelsterne mit einem Neutronenstern vermessen. Sogar schwarze Löcher machen ihre Präsenz kund durch die Rotation ihrer Begleitsterne.

Die moderne Kosmologie beginnt im Jahr 1929 mit der Entdeckung der Expansion des Weltalls durch Hubble. Spektrallinien vom Zerfall angeregter Atomzustände in heißen Sternen verändern ihre Wellenlänge, wenn die Sterne sich von uns wegbewegen. Hubbles fundamentale Entdeckung ist, dass die Geschwindigkeit der Sterne mit ihrer Distanz zunimmt, also wir alle auf einem Ballon sitzen, der kontinuierlich aufgeblasen wird. Die Hubble-Konstante charakterisiert damit eine Zeitskala für das Alter des Universums, welches mit 10.000 Millionen Jahren abgeschätzt werden kann.

Das kopernikanische Prinzip wurde durch Robertson, Walker und Friedmann in der Weise verallgemeinert, dass niemand von sich sagen kann, er befinde sich im Zentrum des Universums. Das Universum ist homogen und isotrop, d.h. gleichförmig in alle Richtungen und unbeeinflusst von den Dichteschwankungen auf kleineren Skalen, die durch die Galaxienhaufen verursacht werden. Die Theorie Einsteins beschreibt dieses Universum mit Hilfe von zwei Größen, einem Skalenfaktor, welche die Größe der Raumzeit angibt, und einer Krümmung, die sagt, ob das Universum flach, positiv oder negativ gekrümmt ist (Abb. 3). In drei Dimensionen ist eine Ebene flach, eine Kugel positiv gekrümmt und ein Hyperboloid negativ gekrümmt. Die allgemeine



**Abbildung 3: Dreidimensionale Bilder von zweidimensionalen gekrümmten Mannigfaltigkeiten. Die Oberfläche einer Kugel (links) hat eine positive Krümmung, die Oberfläche des Hyperboloids (rechts) hat eine negative Krümmung.**

Relativitätstheorie beschreibt die zeitliche Änderung des Skalenfaktors des expandierenden Universums, genau sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung der Ausdehnung des Weltalls. Die Geschwindigkeit hängt von der Energiedichte (inklusive einer möglichen kosmologischen Konstanten) und der Krümmung ab. Die Beschleunigung wird von der Zustandsgleichung der Materie/Energie-Form bestimmt, die sich im Universum befindet. Ein Gas von masselosen Photonen hat eine andere Relation zwischen Energiedichte und Druck als ein System von schweren, langsamen Atomkernen. Jede Art von

Flüssigkeit oder Gas mit einem positiven Druck führt dazu, dass die Expansion des Weltalls langsam zum Stillstand kommt; die gegenseitige Anziehung der Materie verlangsamt die Ausdehnung.

Der Skalenfaktor des Universums ist experimentell messbar durch die Rotverschiebung des Lichts. Durch die Ausdehnung des Weltalls wird die Wellenlänge von Photonen in einem expandierenden Universum länger. Durch die Expansion wird nicht nur die Energie der Photonen kleiner, auch die Energie von massiven Teilchen verringert sich. Ein Gas von Teilchen kühlt sich bei der Ausdehnung ab. Deshalb muss das Universum früher kleiner und heißer gewesen sein. Beim Urknall war es unendlich dicht und energiereich. Nur wenige der existierenden Theorien verneinen, dass es seinen Urknall gegeben hat.

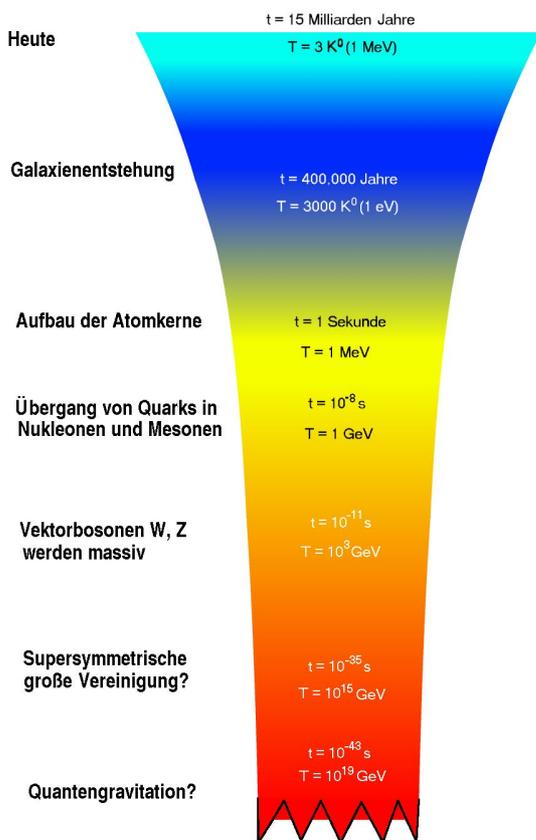


Abbildung 4 : Geschichte des Universums mit den Zeiten nach dem Big Bang und den dazugehörigen Temperaturen.

Der Physik ist es gelungen eine Archäologie des Universums zu begründen, die schlüssig bis zu einer Sekunde nach dem Urknall zurückgeht (Abb. 4). Das Universum war 1000 Millionen Jahre alt, als unsere Galaxie sich formte. Nach 400.000 Jahre bildeten sich Atome, als sich die Strahlung, d.h. Licht, von der Materie abkoppelte und damit das Universum transparent für diese Strahlung wurde. Es hatte zu dieser Zeit eine Temperatur von 3000°K, tausendmal heißer als die jetzige Temperatur des Weltalls (Null° Celsius ist 273°K). Das Weltall bestand zuvor aus einem heißen Plasma von Protonen, Elektronen und Photonen mit ein paar Heliumkernen und vielleicht noch Lithiumkernen und war undurchsichtig, das heißt die freie Weglänge von Licht war viel kleiner als die Ausdehnung des Weltalls. Wenn die Temperatur später unter 3000°K gefallen ist, verbinden sich die

Protonen und Elektronen in neutrale Atome, zuerst Heliumatome und dann Wasserstoffatome. Nach dieser Vereinigung wächst die freie Weglänge des Lichts bis auf die Dimension des Universums, da die Energie des Lichts nicht mehr ausreicht, Atome zu ionisieren. Das Universum wird transparent. Beim Zeitpunkt der Atombildung haben die Photonen das Spektrum der Wärmestrahlung eines heißen Körpers mit einer charakteristischen Spektralverteilung ähnlich der Sonne, aber einer Temperatur von 3000° Kelvin. Wenn wir diese elektromagnetische Strahlung jetzt messen, finden wir sie im

Mikrowellenbereich, bei einer Temperatur von  $3^\circ \text{K}$ . Der Faktor Tausend erklärt sich durch die tausendfache Ausdehnung des Weltalls seit der Zeit der Produktion dieser Strahlung. Dieses sogenannte kosmische Hintergrundstrahlung ist wahrscheinlich das überzeugendste Fundstück für die Archäologie des frühen Universums.

Seit der Entdeckung der Mikrowellenstrahlung durch Penzias und Wilson sind neuere und sehr empfindliche Satellitenmessungen gemacht worden von COBE (Cosmic background explorer) and WMAP (Wilkinson microwave anisotropy probe), die eine sehr homogene Verteilung der Hintergrundstrahlung in allen Richtungen nachgewiesen haben. Die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung ist konstant bis auf Abweichungen von einem Teil in 100.000 und gibt damit sehr genaue Informationen über die Dichtefluktuationen des Universums im jugendlichen Alter von 300.000 Jahren. Aus diesen Dichtefluktuationen sind unsere Galaxien entstanden. Das frühe Universum dokumentiert seine Entstehungsgeschichte in der Anisotropie der  $3^\circ \text{K}$ -Strahlung. Unter dem Einfluss der anziehenden Schwerkraft verdichteten sich Materiewolken. Das Plasma aus Protonen, Elektronen und Photonen reagiert auf diesen Kollaps der Protonen in dichtere Regionen, indem sie die Protonen durch die elektrische Abstoßung wieder abstoßen. Es entstehen Dichteoszillationen ähnlich den Dichteschwankungen der Luft, wenn wir miteinander sprechen. Zu laute Sprache führt zu einer lokalen Erwärmung, die sich im Spektrum der Hintergrundstrahlung widerspiegelt. Der Öffnungswinkel dieser Fluktuationen hängt mit der Geometrie des Universums zusammen. Objekte einer gegebenen Winkelgröße sind kleiner in einer sphärischen (positiv) gekrümmten Raumzeit als in einer flachen Raumzeit.

Die Details sind kompliziert, aber das Resultat ist von großer Bedeutung für unser Bild des Weltalls. Die Mikrowellenmessungen deuten auf ein flaches Universum ohne Krümmung hin. Damit stellen sich zwei Probleme in der Kosmologie, die unsere jetzige Forschung beschäftigen. Wie kann eine flache Lösung der Einstein-Gleichungen existieren, obwohl sie besonders instabil ist und einen sehr sorgfältig gewählten Anfangswert für die Energiedichte des Universums verlangt? Auch die Uniformität des Mikrowellenhintergrunds ist nicht leicht zu verstehen. Wenn wir die Struktur von verschiedenen räumlichen Teilen des Universums zum Zeitpunkt der Entkopplung anschauen, stellen wir fest, dass sie zum Zeitpunkt des Big Bangs nur schwach miteinander in kausalem Kontakt waren. Es überrascht, dass Teile des Universums, die nicht voneinander wissen, die gleiche Temperatur haben sollen.

Wie ein *deus ex machina* erscheint die Idee eines inflationären Universums. Die Einstein-Gleichungen erlauben einen exponentiell ansteigenden Skalenfaktor des Universums, falls es ein skalares Feld gibt, welches mit extrem kleiner kinetischer Energie evolviert, so dass seine überwiegende potentielle Energie die Expansion treibt. Die Expansion ist extrem schnell. In  $10^{(-35)}$  Sekunden vergrößert sich das Universum um viele Größenordnungen. Dieser inflationäre Stoff bläst das Universum so rasant auf, dass selbst die

entlegendsten Teile des Mikrokosmos bei der Entkopplung noch miteinander in Kontakt gewesen sein können.

Nun kann eine solche *deus ex machina*-Lösung zu Anfang des Universums nicht so leicht in das Lehrbuch der Physik hineingeschrieben werden. Die Astroarchäologen haben noch die andere Strategie weiterverfolgt und sich von der Entkopplung der Photonen 400.000 Jahren nach dem Big Bang langsam rückwärts auf den Big Bang zurückgearbeitet. Nach ihren Rechnungen haben sich die Atomkerne eine Sekunde nach dem Urknall bei Temperaturen von  $10^{10}$  °K gebildet. Die Neutrinos spielen in dieser nuklearen Synthese eine wichtige Rolle und die Existenz von drei leichten Neutrinospezies des Standardmodells stimmt gut mit der Verteilung der Elemente im Weltall überein. Wie schließt sich überhaupt im frühen Universum der Kreis von der makroskopischen Physik zur mikroskopischen Physik? Je früher wir das Universum betrachten, desto heißer ist es, d.h., desto höhere Energieskalen werden wichtig (Abb. 4). Bei  $10^{-6}$  Sekunden, d.h. bei Mikrosekunden wird die Bindung der Quarks und Gluonen in Nukleonen aufgehoben, bei  $10^{-12}$  Sekunden wird die Erzeugung der Masse durch das hypothetische Higgsfeld annulliert. Wir sind dann schon bei Temperaturen von  $10^{15}$  °K.

Hier verlässt die Theorie die entscheidende Vorhersagekraft, welche durch kontrollierte Experimente mit Beschleunigern bestimmt ist. Die Teilchenphysik weiß nicht weiter. Insbesondere die Verletzung der Materie-Antimaterie-Symmetrie ist immer noch unbeantwortet. Es gibt Spekulationen, dass in einer Theorie der großen Vereinigung schwere Neutrinos eine Verletzung der Leptonzahl und damit später eine Verletzung der Baryonenzahl verursacht haben. Bei der Skala der großen vereinigten Theorie von  $10^{16}$  GeV oder  $10^{26}$  °K kommen die Spekulationen über die Inflation ins Spiel. Sie sind also weit von einer experimentellen Nachprüfung im Labor entfernt. Das war der Stand der Forschung bis vor einigen Jahren, als die aufregende Botschaft aus dem Weltall kam, dass weder die sichtbare Materie noch die sichtbare Energie ausreichen, um die kritische Energiedichte für ein flaches Universum zu bilden. Falls das Universum eine Energiedichte größer als die kritische Energiedichte hat, ist das Universum positiv gekrümmt und abgeschlossenes (siehe Abb. 3). Bei einer positiven Raumkrümmung ergibt sich aus den Einsteins-Gleichungen, dass das Universum eine endliche zeitliche Lebensdauer hat. Es kollabiert nach langer Zeit wieder in einem großen Anti-Big Bang oder Big Crunch. Wenn das Universum dagegen eine kleinere Dichte als die kritische Dichte hat, ist seine Geometrie ein offenes Hyperboloid ähnlich (Abb. 3) und hat eine unendliche Lebensdauer. Dazwischen liegt das flache Universum. Wenn Energie und Materie nicht mehr existieren, hören Raum und Zeit noch nicht auf zu existieren. Deshalb gibt es kein Ende des Universums. Die Kosmologen schätzen aus den Massen der Spiralgalaxien, dass die Energiedichte des Universums nur 2%-3% der kritischen Massendichte ausmacht. Optimistisch kann man daraus folgern, dass die Gravitationstheorie und die beobachtende Astronomie nicht ganz divergieren. Trotzdem beunruhigt die Diskrepanz. Schon im Jahre 1930 hat

Zwicky bemerkt, dass die Gravitationskraft der sich tbaren Materie im Virgo Cluster nicht ausreicht, um die fern außen liegende n Sonnensysteme ans Zentrum zu binden. Ebenfalls in der Peripherie unse rer Galaxie sehen wir Randsterne, die um das Zentrum der Galaxienscheibe mit einer so großen Geschwindigkeit kreisen, dass sie aus der Galaxie h erausfliegen müssten. Die Anziehungskraft an die sichtbaren Sterne in unsere r Galaxie ist zu gering, um diese Randsterne auf ihren Bahnen zu halten. Es mus s deshalb dunkle Materie geben. Sie heißt dunkel, weil sie selbst nicht Lich taussendet oder reflektiert. Sie würde auch die Bewegung von Sternen im Zentrum der Milchstraße beeinflussen, nur ist sie wahrscheinlich so gleichm äßig verteilt, dass sich ihr Effektausbalanciert. Dies trifft für Sterne am Ran d der Milchstraßen nicht mehr zu. Auch die Galaxienentstehung selber braucht solc hesich langsam bewegend dunkle Materie, um den kritischen Zusammenhalt zu b ekommen, für welchen bei der Zeitskala ihrer Entstehung die nukleonische Materie nicht ausreicht. Parallel zu der astrophysikalischen Suchen nach Kand idaten für die kalte dunkle Materie haben sich die Mikrophysiker bemüht, in ihr en Theorien Elementarteilchen aufzuspüren, die schwer und schwach wechselwirkend sind. Experimente dazu werden in tiefen Tunnels unter der Erdedurchgeführt, um die störenden Einflüsse der kosmischen Höhenstrahlung a uszuschalten. Das Energiefenster der kosmischen Höhenstrahlung selbst wird kontinuierlich

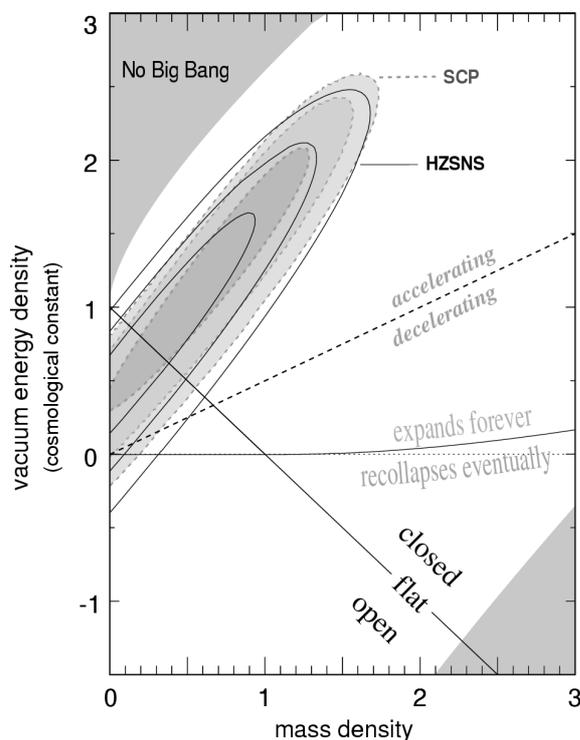


Abbildung 5: Vakuumenergie ( $\approx 0.7$ ) und Materiedichte ( $\approx 0.3$ ) in Einheiten der kritischen Dichte und Supernova Ia-Messungen.

xien im Universum linear mit der Entfernung anwächst. Diese Experimente messen die Beschleunigung der Expansion, indem uns Objekte mit einer großen

erweitert, indem große Detektoren von 10 km mal 10 km Fläche oder mehr das All nach besonders energiereichen Strahlen absuchen, die dann einen weiten Kegel von sekundären Teilchen produzieren, welche in der riesigen Fläche auf der Erde aufgefangen werden. Aus der kombinierten Analyse von Galaxienclustern, Supernovae (Abb. 5) und dem Mikrowellenhintergrund kann der Prozentsatz von kalter Materie begrenzt werden, der zur kritischen Dichte beiträgt. Die kalte dunkle Materie trägt 30% zur kritischen Dichte bei.

Supernovae vom Typ Ia erreichen eine charakteristische maximale Luminosität. Sie dienen deshalb als Standardkerzen, mit deren Hilfe Abweichungen vom Hubble-Gesetz gemessen werden, nach welchem die Expansionsgeschwindigkeit der Galaxien im Universum linear mit der Entfernung anwächst. Diese Experimente messen die Beschleunigung der Expansion, indem uns Objekte mit einer großen

Entfernung schwächer erscheinen als das lineare Gesetz vorhersagen würde. Sie bilden den Schlussstein in einer Kette von Messungen, welche ausgehend von der Mikrowellenstrahlung den Rest der kritischen Dichte einer postulierten dunklen Energie zuordnen (Abb. 5). Diese Energie soll 70 % der kritischen Dichte des Universums ausmachen. Sie ist ebenfalls unsichtbar, d.h., sie hat keine Wechselwirkung mit Licht und macht sich hauptsächlich in einer der anziehenden Gravitation entgegengesetzten Abstoßung bemerkbar, welche die Expansion des Kosmos beschleunigt. Einstein hat in seinen ursprünglichen Gleichungen eine kosmologische Konstante eingeführt, welche exakt die Rolle dieser dunklen Energie spielen könnte. Es gibt zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Artikels (2003) verschiedene Theorien, um diese dunkle Energie zu erklären. Zu den vier Wechselwirkungen, die wir kennen: Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung, starke Wechselwirkung und Gravitation kommt vielleicht also eine fünfte Kraft die Quintessenz. Ähnlich hat es Aristoteles schon gemacht, als er zu den vier Elementen auf der Erde in der Himmelsphäre eine quinta essentia einführte, welche die ewig unveränderliche Bewegung der Himmelskörper bestimmt. Im Gegensatz zur kosmologischen Konstante verändert sich die Quintessenz mit der Zeit. Eine der wichtigsten Größen dieser dunklen Energie ist ihre Zustandsgleichung. Wie hängt ihr Druck mit ihrer Energie zusammen?

„Only five years ago, breakthroughs in technology and astronomical technique led to the discovery that the expansion of the universe is accelerating. The future holds promise of even greater technological advances that will uncover further cosmological surprises”, lautet das Ende eines Artikels<sup>9</sup> mit dem Titel “Precision Cosmology? Not just yet...”. In gleicher Weise wie in der Elementarteilchenphysik versuchen die Physiker jetzt mit Hilfe dieser neuen technologischen Möglichkeiten eine konsistente Theorie zu entwickeln, d.h. ein Standardmodell der Kosmologie zu konstruieren. Nach dem heutigen Stand haben Raum und Zeit einen definierten Ursprung, den Big Bang, mit fast unendlicher Temperatur. Das Universum dehnt sich aus, kühlt ab und verdünnt sich bis in unendliche Zeiten, folgend den Einsteinschen Gesetzen, aber mit fast 97% unbekanntem Bestandteil aus dunkler Materie und Energie. Vielleicht zu Recht regensich hier und dort Opponenten, die als Gegenmodelle ein zyklisches Universum mit unendlich vielen Zyklen von Ausdehnung und Kontraktion, Abkühlung und Erhitzung vorschlagen. Ihre Hauptkritik ist, dass alle Modelle ein extrem feines Einstellen von vielen ad hoc-Parametern brauchen, um zum Erfolg zu kommen. Im zyklischen Modell gäbe es keine Singularität am Anfang. Der Big Bang wäre ein Wiederauferstehen eines Universums, welches sich zu maximaler Dichte und Temperatur zusammengezogen hat und jetzt wieder expandiert. Die frühe Expansionsphase und die jetzt beobachtete beschleunigte Expansion sind vom gleichen Mechanismus erzeugt und alles geht viel langsamer vor sich. Die Gravitationswellen in der Inflation hätten deswegen

<sup>9</sup>S.L.Bridle, O.Lahav, J.P.Ostriker and P.J.St

einhardt, astro-ph/0303180 (März 2003)

eine viel kleinere Amplitude als im Standardmodell. Leider sind die jetzigen Detektoren nicht empfindlich genug, um die Gravitationsstrahlung aus dem frühen Universum nachzuweisen. Verschiedene Modelle versuchen, die Erkenntnisse der Stringtheorie mit mehr als vier Dimensionen in ihre Kosmologie einzubauen. Extradimensionen können die Schwachheit der Gravitation plausibel machen, indem sie fordern, dass die Wechselwirkungen des Standardmodells auf unsere 3+1-Dimensionen beschränkt sind und nur die Gravitation zusammen mit anderen Feldern in die restlichen 6 Dimensionen hineinwirkt. Sie verteilt sich dadurch und wird schwächer. Auf Distanzen, die groß sind im Vergleich zur Skala der Extradimensionen, erscheint die Gravitation in ihrer gewohnten Form. In dieser magischen Theorie (M-Theorie) erscheint neben unserem Universum, das eine 3-dimensionale Unterfläche in der 10-dimensionalen Welt darstellt, eine zweite Unterfläche getrennt von unserer Welt durch einen zeitlich veränderlichen Abstand in einer der Extradimensionen. Die Teilchen auf dieser Geschwisterwelt wirken durch ihre Gravitation auf unsere Welt und spielen die Rolle der dunklen Energie. Das ex machina-Inflatonfeld wird zu einer Komponente in der M-Theorie und hängt mit dem Abstand der Welten in der Extradimension zusammen. Ein Zyklus ergibt sich durch ein Auseinanderlaufen der verschiedenen Welten und ein Wiederausammenkommen.

Einer der Gurus der Quantenkosmologie Hawking hat sich zu der Formulierung durchgerungen: "This means that the histories of the universe depend on what is being measured contrary to the usual idea that the universe has an objective, observer independent, history. The Feynman path integral allows every possible history of the universe, and the observation selects out the sub class of histories that have the property that is being observed." <sup>10</sup> Er behauptet, dass, ähnlich dem Gödelschen Theorem in der Mathematik, die Physik von der Selbstreferenz in eine Situation getrieben werden kann, in der auch die Theorie von Allem (dies ist ein anderer Weltname für die Stringtheorie) nicht mehr ein vollständiges Bild der Wellenfunktion des Universum herstellen kann.

#### 4. Ausblick in zukünftige Bilderwelten

An drei Beispielen habe ich versucht, das bewegte physikalische Bild unserer Welt darzulegen. Gesicherte Kenntnisse vermischen sich an den Grenzen unseres Wissens mit wilden Spekulationen, die zu neuen Experimenten oder Beobachtungen führen, welche die Grenze unseres Wissens erweitern. Neu an diesem Weltbild ist, dass eine viel größere Zahl von Menschen als jemals zuvor es teilen. Die Gemeinde der Naturforscher und ihrer Interessenten hat sich vergrößert und internationalisiert. Populäre Bücher zur Kosmologie werden in

---

<sup>10</sup>S. Hawking, Cosmology from Top to Down, astro-ph/0305562

weiten Kreisen gelesen. Ein ausgeklügeltes Informationssystem speichert und verbreitet alle neuen Entwicklungen in der Physik auf der ganzen Welt in Sekundenschnelle.<sup>11</sup> Unsere erweiterten Sinnesorgane haben sich in den Weltraum hinausgestreckt. Dieser Schritt ist ein mindestens ebenso bedeutender Schritt für die Forschung wie der erste Mensch auf dem Mond. Die Wissenschaft vom extrem Kleinen, symbolisiert durch die Physik der Elementarteilchen, hat sich mit der Physik des maximal großen Kosmos vereinigt, um das Rätsel der Urentstehung zu lösen. Der unablässige Drang in der Physik, disparate Erscheinungen zu vereinheitlichen, d.h., auf eine gemeinsame Basis zu stellen, manifestiert sich hier in einer neuen Gestalt. Die mesoskopische Physik der mittleren Dimensionen erscheint dazwischen wie ein Mittler, die bizarren Wege der Quanten auf immer größeren Längenskalen zu erforschen. Der Physiker kann das Verhalten der Materie nur indirekt mit Hilfe der Gesetze entschlüsseln. Ich habe vorgeschlagen, der Substanz, zu dem sich beide, Form und Materie, vereinigen, einen höheren Stellenwert zu geben. In der Tat ist es die Dreieitigkeit von Materie, mathematischer Form und experimentellen Daten, auf welcher die physikalische Zeichenwelt gründet.<sup>12</sup> Realismus und Antirealismus reichen als Kategorien nicht aus, um die Konstruktion physikalischer Wirklichkeit mit Hilfe von empirischen Forschungsergebnissen zu diskutieren. Das Experiment, das durch die verfeinerte technische Entwicklung Möglichkeiten erworben, eine wichtige Rolle bei der Beantwortung vieler Fragen zu spielen, die früher als philosophische oder religiöse Fragen eingestuft wurden. Am Beispiel der Atomphysik, Quantenmechanik und Kosmologie habe ich versucht darzustellen, dass sich unser Wirklichkeitsbegriff auf eine Welt erstreckt, in der „verschränkte“ Quantenzustände aus dem Reich der symbolischen Formen eine eigene Daseinsberechtigung erlangen. Das Verständnis der Weltentstehung geht auf die ersten Mikrosekunden zurück, dahinter ist die Unsicherheit groß, da wir Experimente im Labor nicht bei beliebig hohen Energien durchführen können. Wir verstehen trotzdem nur 3% der kritischen Energie, die nach der allgemeinen Relativitätstheorie nötig ist, um ein flaches Universum zu haben, welches die Messungen der Mikrowellenstrahlung verlangen. Der größte Teil der kritischen Dichte ist dunkel und entzieht sich direkter Beobachtung durch elektromagnetische Strahlung; davon werden 27% dunkler Materie und 70% dunkler Energie zugerechnet, die verschiedene Zustandsgleichungen besitzen.

Ich habe nicht versucht, die ersten Schritte der Physik in Richtung auf den Menschen, seine Biologie, sein Bewusstsein zu beschreiben, welche in den letzten 40 Jahren in den biophysikalischen und kognitiven Wissenschaften begonnen hat. Hier wurde das Gebiet zwischen dem Bewusstsein und der neuronalen Hardware mit Hilfe von sehr empfindlichen neuen Experimenten analysiert und mit statistischen und Computermodellen beschrieben. In bisher

<sup>11</sup>Daselektronische Archiv in der Physik, Mathematik, und Computerwissenschaft in der Reichweite unter <http://de.arxiv.org/>. Alle Internetreferenzen in diesem Artikel können dort eingesehen und abgeholt werden.

<sup>12</sup>H.J. Pirner, in Referenz 5, S. 219

wenig überzeugender Weise wurde sogar die Quantenhypothese der vielen Welten mit dem Bewusstsein in Verbindung gebracht<sup>13</sup>. Dies mag der Anfang einer anderen Entwicklungslinie der Physik sein, deren Verlauf in diesem Jahrhundert nicht vorhersagbar ist. Die Physiker sind eine offene Wissenschaft und weitere Überraschungen sind zu erwarten.

---

<sup>13</sup>D.N. Page, Mindless Sensationalism, a quantum framework for consciousness, in *Consciousness: New Philosophical Essays*, Oxford, 2002, quant-ph/0108039